

**PROPUESTA DEL AJUSTE DE LAS CURVAS DE GASTO DE LA CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA
A UNA ECUACIÓN MATEMÁTICA**



**DAYANA PATRICIA MOLINA TILANO
LINA MARÍA PARGA HERNÁNDEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Director:

YULIA IVANOVA

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ, 10 DE OCTUBRE DE 2018**

PROPUESTA DEL AJUSTE DE LAS CURVAS DE GASTO DE LA CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA A UNA ECUACIÓN MATEMÁTICA

Proposal for the adjustment of the rating curves of Chicamocha river watershed to a mathematical equation

Dayana Patricia Molina Tilano ¹, Lina María Parga Hernández ², Yulia Ivanova ³

¹ u1102080@unimilitar.edu.co, ² u1102084@unimilitar.edu.co,

³ yulia.ivanova@unimilitar.edu.co

1. RESUMEN

Debido a la necesidad de conocer la disponibilidad del recurso hídrico, se efectúa la construcción de una curva cuyo fin relaciona dos variables hidrológicas como lo son el nivel y caudal y es conocida como curva de gasto. La curva de gasto utiliza datos geométricos de la sección del cauce y campañas de aforo con el fin de determinar caudales a partir de los niveles medidos. Actualmente en Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) realiza un promedio de tres a cuatro aforos por año, intervalo que no cumple con los estándares internacionales que proponen un mínimo de diez aforos, situación que puede afectar potencialmente la exactitud de la curva.

El método utilizado por el IDEAM para la construcción de esta curva consiste en trazar una línea suavizada a través de una nube de puntos cuyos valores son tomados a partir de campañas de aforos (Salazar & Chaparro, 1999). Al ser este un método dispendioso por cuestiones de tiempo se hace necesario evaluar métodos más eficientes en términos económicos y temporales. Con este fin se propone una metodología en la cual se logre optimizar la manera en la que se construyen las curvas de caudal versus nivel a través del ajuste de las mismas mediante ecuaciones matemáticas.

Como resultado se obtuvo que las ecuaciones más favorables para el conjunto de datos de cada estación fueron las ecuaciones de grado dos, las cuales cumplían con los criterios de selección establecidos. Adicional a esto se observa una disminución en los errores de dispersión de la curva ajustada a ecuaciones matemáticas con respecto a las curvas actuales vigentes construidas por el IDEAM.

Palabras clave: Curvas de gasto, error de dispersión, caudal, nivel, cuenca del río Chicamocha, ecuaciones matemáticas, exactitud.

2. ABSTRACT

Due to the need to know the availability of water resources, the construction of a curve whose purpose relates two hydrological variables such as level and flow and is known as the rating curve. The rating curve uses geometric data of the section of the channel and gauging campaigns in order to determine flow rates from the measured levels. Currently in Colombia, the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) performs an average of three to four gauging per year, an interval which does not meet international standards that propose a minimum of ten gaugings, a situation that can potentially affect the accuracy of the curve.

The method used by the IDEAM for the construction of this curve is to draw a smoothed line through a cloud of points whose values are taken from gauging campaigns (Salazar & Chaparro, 1999). Since this is a time-consuming method, it is necessary to evaluate more efficient methods in economic and temporal terms. To this end, a methodology is proposed in which it is possible to optimize the way in which flow versus level curves are constructed by adjusting them through mathematical equations.

As a result, the most favorable equations for the data set of each station were the equations of degree two, which met the established selection criteria. In addition to this, there is a decrease in the errors of dispersion of the curve adjusted to mathematical equations with respect to current curves constructed by the IDEAM.

Keywords: Rating curves, error of dispersion, flow, height, Chicamocha river watershed, mathematical equations, accuracy.

3. INTRODUCCIÓN

Las curvas de gasto son un instrumento para definir la oferta y la variabilidad de la esorrentía superficial que son indispensables para sustentar y planear diferentes usos del recurso hídrico superficial. Estas curvas se construyen con base en los datos geométricos de la sección transversal y las campañas de aforo y permiten deducir el caudal a partir de los niveles medidos en las estaciones hidrológicas. La relación entre estas dos variables es definida mediante la obtención de datos batimétricos y caudal conocida como aforo.

La precisión de las curvas de gasto depende de un conjunto de factores donde, en primer lugar, se encuentra el error de medición de campaña de aforo asociado a la batimetría y a la medición de la velocidad. La segunda fuente de error se llama error de estimación y proviene de la dispersión de los datos empíricos con relación a la curva de gasto. La tercera fuente del error aparece en el caso cuando una relación se construye con base en una regresión y representa el error de la ecuación de la regresión.

Actualmente en Colombia las curvas de gasto se construyen mediante un cierto número de aforos, los cuales cada vez son menores debido al presupuesto asignado para la ejecución de los mismos, por lo que la exactitud de la curva puede verse potencialmente afectada. En promedio el IDEAM realiza de tres a cuatro aforos por año, lo cual termina siendo deficiente según estándares internacionales los cuales recomiendan un mínimo de diez mediciones anuales (OMM-N°168, 1994). A partir de esto se hace necesario valorar la exactitud de las curvas de gasto, ya que la oferta hídrica del país se establece mediante las curvas generadas.

Se hace prioritario evaluar la exactitud de las curvas de gasto en las cuencas hidrográficas altamente intervenidas por los usos antrópicos y donde ya se presenta un conflicto por el uso del agua. En el estudio se analiza la cuenca del río Chicamocha puesto que genera el 58% del Producto Interno Bruto (PIB) del Departamento de Boyacá, del cual, el 54% de la actividad económica recae sobre el corredor industrial, el cual lo componen los municipios de Tunja, Tuta, Duitama, Paipa, Nobsa, Sogamoso y Tibasosa (Corpoboyacá, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2006). El desarrollo de las actividades productivas en la cuenca se sustenta en la disponibilidad del recurso hídrico. Por consiguiente, el conocimiento exacto sobre la oferta hídrica permite una gestión más sostenible del recurso hídrico.

Por lo tanto, en el estudio se evalúa, en primer lugar, la exactitud de las curvas de gasto actuales de siete estaciones hidrológicas, y en segundo lugar, se analiza si los datos de las curvas de gasto pueden ser ajustados a una ecuación matemática cumpliendo con la exactitud exigida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). El alcance de la evaluación de la exactitud de la curva de gasto construida con base en la ecuación de regresión se limita a la definición del error asociado a la dispersión de los datos en relación a la línea.

4. OBJETIVOS

4.1 General:

Evaluar la posibilidad de ajustar las curvas de gasto a una ecuación matemática de las siete estaciones localizadas en la cuenca alta del río Chicamocha.

4.2 Específicos:

- Determinar la exactitud de las curvas de gasto actuales de siete estaciones hidrológicas de la cuenca alta del río Chicamocha.
- Construir y evaluar la exactitud de las curvas de gasto generadas a través de las ecuaciones matemáticas según las normas de la OMM.

5. METODOLOGÍA

La siguiente figura muestra esquemáticamente la metodología aplicada para el ajuste de las curvas de gasto a ecuaciones matemáticas.

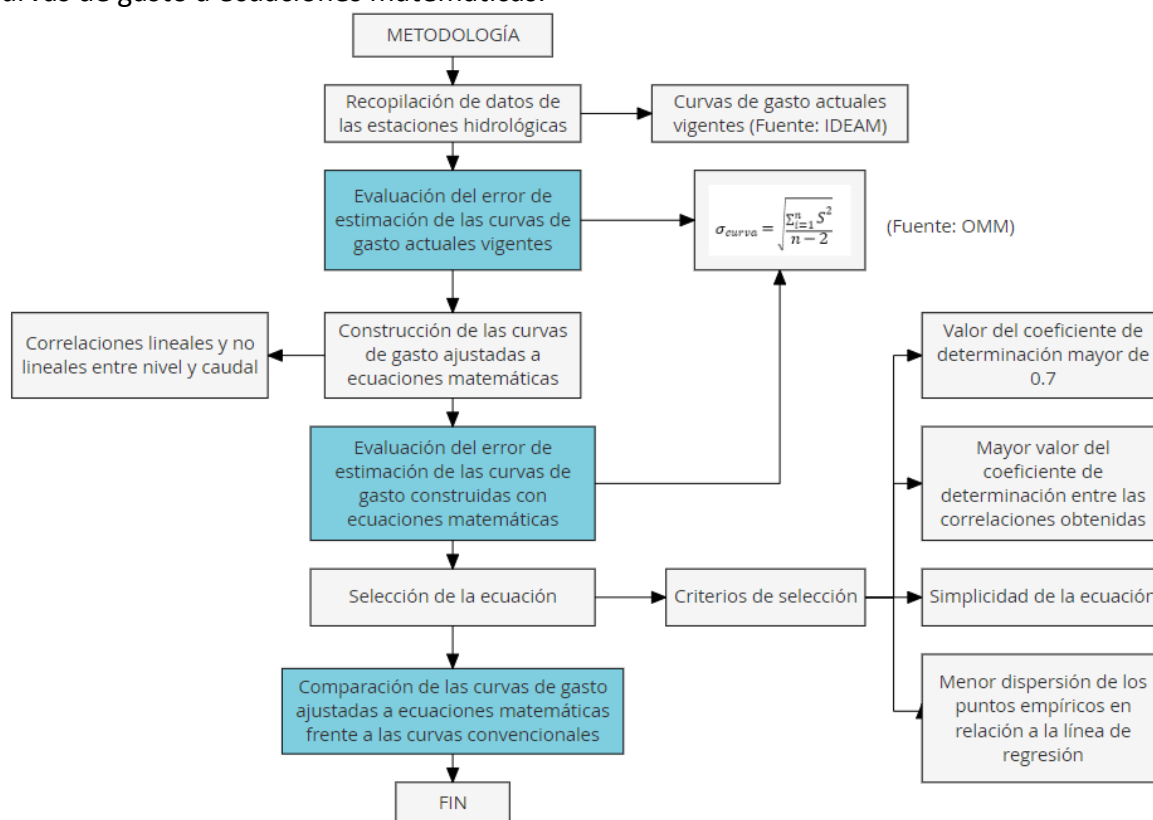


Figura 1. Metodología aplicada para el ajuste de las curvas de gasto a ecuaciones matemáticas

Fuente: Elaboración propia.

El análisis realizado se basa en los datos de las siete estaciones hidrométricas localizadas en la cuenca del río Chicamocha. A continuación, se presenta la información general de las estaciones.

Tabla 1. Red de estaciones hidrológicas cuenca del Río Chicamocha.

Tipo	Nombre	Código	Municipio	Departamento	Longitud	Latitud	Período de observación
LG	La Reforma	24037130	Sotaquirá	Boyacá	-73,189889	5,748833	2014-2017
LG	San Rafael	24037190	Duitama	Boyacá	-73,013806	5,807611	2016-2017
LG	Pte Chameza	24037290	Nobsa	Boyacá	-72,906528	5,759889	2010-2017
LG	La Siberia	24037320	Paipa	Boyacá	-73,108722	5,766733	2005-2017
LM	Capitanejo	24037390	Capitanejo	Santander	-72,695453	6,513208	2005-2017
LG	Paz de Río	24037510	Paz de Río	Boyacá	-72,782222	6,000278	2015-2018
LM	El Jordán	24037360	Jordán	Santander	-73,096667	6,749722	1997-2018

En la siguiente Figura se presenta la distribución espacial de las estaciones en la cuenca.

PROPUESTA DEL AJUSTE DE LAS CURVAS DE GASTO DE LA CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA A UNA ECUACIÓN MATEMÁTICA

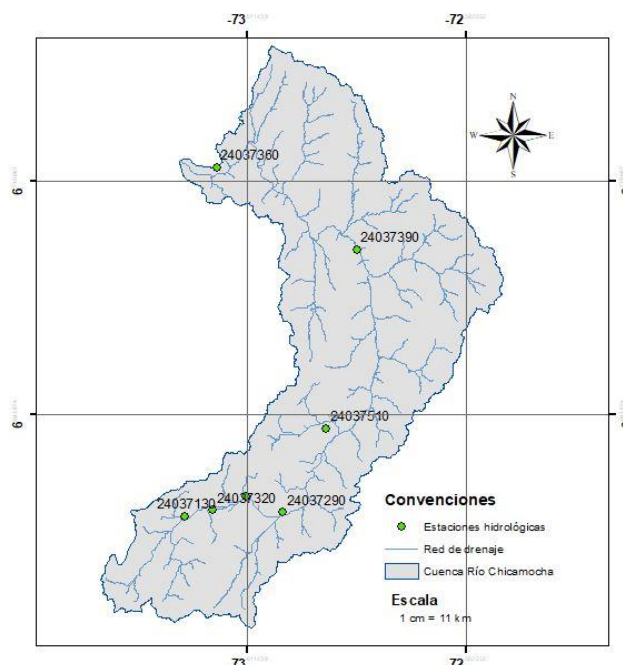


Figura 2. Distribución espacial de las estaciones hidrológicas en la cuenca del río Chicamocha.

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento metodológico se divide en dos partes. La primera corresponde a la evaluación de la exactitud de las curvas de gasto existentes y la segunda está en la construcción de la curva de gasto a través de las correlaciones.

Como se había mencionado anteriormente, las curvas de gasto vigentes que maneja el IDEAM se construyen normalmente con base en relación potencial empleando diferentes metodologías cumpliendo los siguientes criterios: que la relación sea correcta, precisa, proporcionar la lectura de caudales con un rango de error mínimo, igual distribución de puntos a los lados de la curva y menor desviación en la curva. Posteriormente se realiza la extrapolación de la curva a través de los métodos existentes en función si son niveles bajos (Método logarítmico, método de Running, Johnson) o altos (Método de Manning, Stevens, área velocidad o logarítmico).

La determinación del error de las curvas de gasto actuales se hace mediante la valoración de la dispersión de las observaciones con respecto a la línea, dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{curva} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n S^2}{n-2}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Fuente: (OMM-N°168, 1994).

Dónde S^2 es la distancia que separa el punto de observación, en ese caso es el punto del aforo, con respecto al valor de la regresión que corresponde al valor de la curva actual vigente y n es la cantidad de los datos empíricos con la cual fue construida la curva de gasto

(Preciado, 1969). El valor obtenido indica la dispersión de los datos empíricos de caudales frente a la curva de gasto teórica.

El siguiente paso en la metodología consiste en construir las curvas de gasto ajustadas a una ecuación matemática y analizar la exactitud de estas frente a la de las convencionales. La posibilidad de ajustar la curva de gasto a una ecuación matemática con una exactitud cercana a la de curvas de gasto actuales del IDEAM optimizaría tanto el tiempo de la construcción de esta como la toma de los caudales a través de los niveles.

La construcción de las curvas de gasto se realiza a través de correlaciones lineales y no lineales entre las dos variables hidrológicas. Se selecciona la ecuación de correlación como representativa para la relación caudal versus nivel con base en los siguientes criterios:

- Valor del coeficiente de correlación mayor de 0.7
- Mayor valor del coeficiente de correlación entre las correlaciones obtenidas
- Simplicidad de la ecuación (se da la preferencia a las relaciones lineales por tener menor error de ecuación)
- Menor dispersión de los puntos empíricos en relación a la línea de regresión evaluada a través de la siguiente ecuación

Finalmente, se comparan las dispersiones de los datos empíricos de las curvas de gasto actuales y las de regresión y se concluye sobre la pertinencia de elaborar las curvas de gasto a través del análisis regresivo. Suponiendo que las curvas de gasto actuales se construyen con el criterio de minimizar el error de estimación de los caudales, la dispersión de estas se considera como referente en la evaluación de la dispersión de los puntos frente a la línea de regresión en las curvas estadísticamente construidas.

6. RESULTADOS

6.1 Exactitud de las curvas de gasto actuales vigentes

De acuerdo con la OMM, existen varias fuentes de error que pueden interferir en la exactitud de las mediciones hidrológicas. Entre los errores más relevantes se encuentran: el error de medición, que proviene de las campañas de aforos, el error de estimación, asociado a la dispersión de los datos empíricos y el error de la ecuación de la regresión.

A continuación se muestran las curvas de gasto actuales vigentes que relacionan nivel y caudal para cada una de las estaciones del caso de estudio, donde la curva azul corresponde a la curva actual vigente obtenida mediante diferentes métodos de extrapolación por el IDEAM, y la dispersión de puntos que corresponde a los datos empíricos a través de la campaña de aforos.

PROPUESTA DEL AJUSTE DE LAS CURVAS DE GASTO DE LA CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA A UNA ECUACIÓN MATEMÁTICA

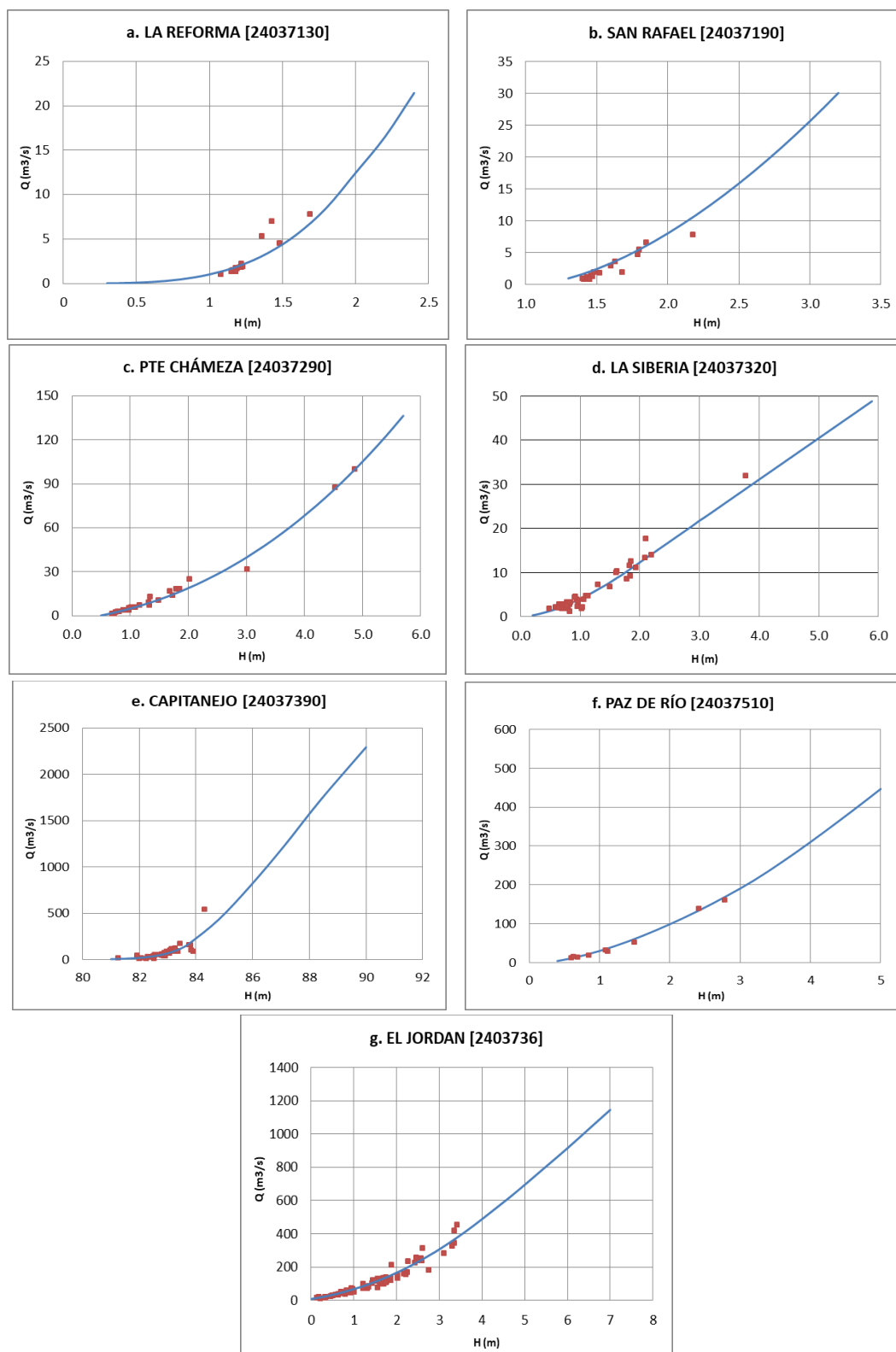


Figura 3. Curvas de gasto actuales para cada una de las estaciones del caso de estudio.

Fuente: IDEAM

Para efectos del trazado de las curvas actuales vigentes construidas mediante diferentes métodos de extrapolación, se determinó el error de estimación aplicando la ecuación 1 con el fin de tener una aproximación del nivel de incertidumbre, considerando el número de

PROPUESTA DEL AJUSTE DE LAS CURVAS DE GASTO DE LA CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA A UNA ECUACIÓN MATEMÁTICA

aforos realizados y la desviación de los datos empíricos con respecto a la curva obtenida (tabla 2).

Tabla 2. Resultados del error de estimación de las curvas de gasto actuales

ESTACIÓN	CÓDIGO	NÚMERO DE AFOROS	MÉTODO DE EXTRAPOLACIÓN	ERROR DE ESTIMACIÓN (σ curva actual) m ³ /s
LA REFORMA	24037130	15	Área-Velocidad	1.18
SAN RAFAEL	24037190	16	Área-Velocidad	1.28
PTE CHÁMEZA	24037290	27	Stevens	2.52
LA SIBERIA	24037320	45	Área-Velocidad	1.20
CAPITANEJO	24037390	39	Área-Velocidad	50.12
PAZ DE RÍO	24037510	9	Área-Velocidad	6.02
EL JORDAN	2403736	78	Área-Velocidad	25.65

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con estos resultados se encontraron errores de 1.18 a 50.12 m³/s. Las dispersiones más altas se presentan en las estaciones de Capitanejo y El Jordán. Sin embargo, es necesario evaluar el rango de caudales en los que se encuentra río Chicamocha en cada punto de observación para considerar si los errores presentados son altos o no (tabla 3).

Tabla 3. Rango de caudales de la curva actual vigente

ESTACIÓN	CÓDIGO	Q MIN (m ³ /s)	Q MAX (m ³ /s)	ERROR (σ curva actual) (m ³ /s)
LA REFORMA	24037130	1.02	7.78	1.18
SAN RAFAEL	24037190	0.76	7.72	1.28
PTE CHÁMEZA	24037290	1.21	100.01	2.52
LA SIBERIA	24037320	1.12	31.83	1.20
CAPITANEJO	24037390	10.35	540.12	50.12
PAZ DE RÍO	24037510	11.01	160.37	6.02
EL JORDAN	2403736	12.09	455.28	25.65

Fuente: Elaboración propia

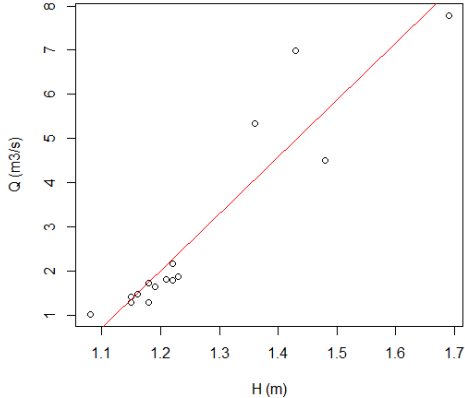
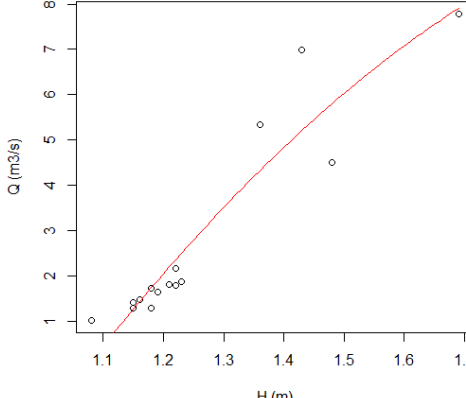
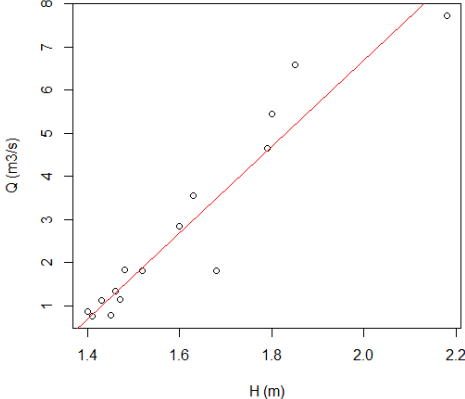
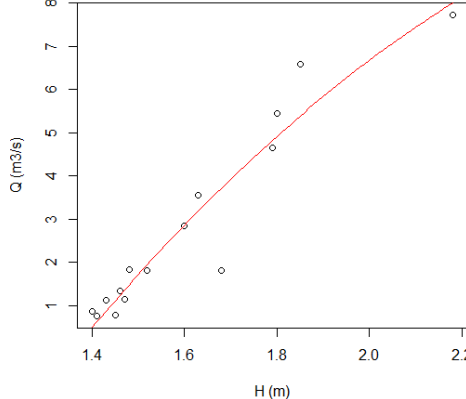
6.2 Ajuste de las curvas a una ecuación matemática

Para el ajuste de las curvas de gasto a una ecuación matemática se realizó una serie de regresiones lineales y no lineales, utilizando las variables nivel y caudal. Se obtuvieron para cada una de las estaciones dos curvas ajustadas a la nube de puntos, una lineal y otra de polinomio grado dos, para las cuales le corresponde a cada una, una ecuación matemática y por consiguiente un coeficiente de correlación, el cual permite determinar la asociación lineal entre las dos variables hidrológicas (OMM-N°168, 1994).

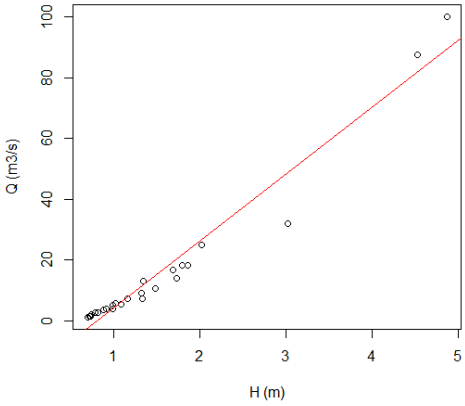
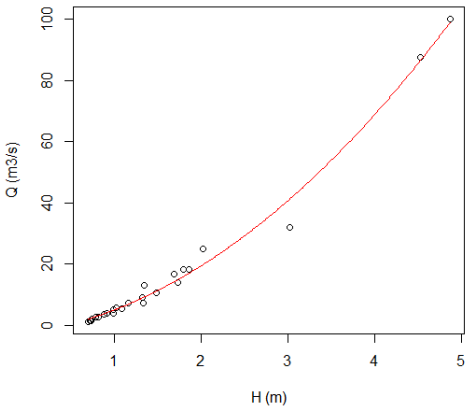
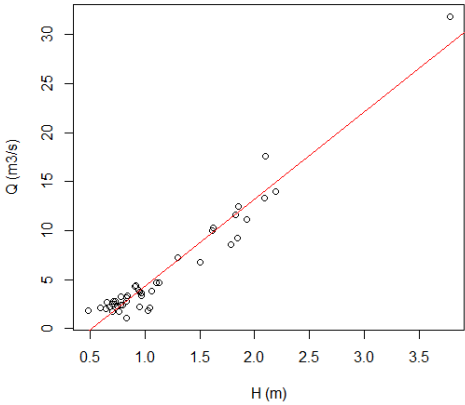
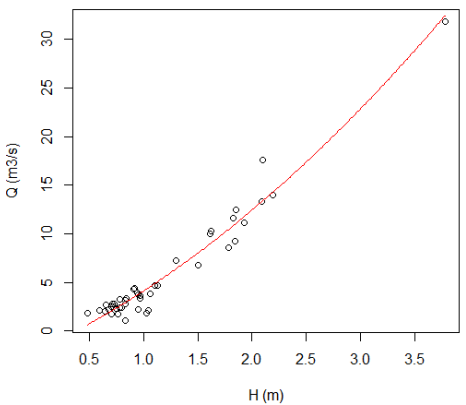
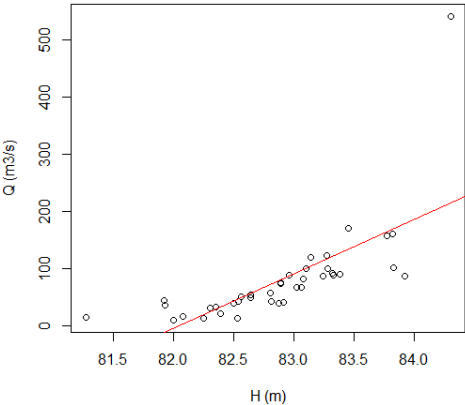
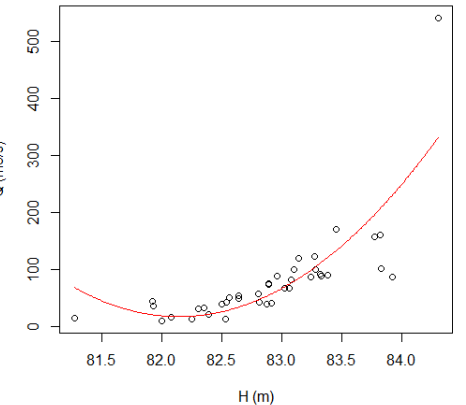
Para el análisis de cada uno de los casos se trabajaron polinomios de grado uno y dos, ya que las curvas ajustadas a ecuaciones polinómicas de mayor grado presentan concavidades y

puntos de inflexión muy altos los cuales contradicen a las geometrías de los cauces naturales que al final definen la forma de la relación caudal versus nivel.

Tal como se observa a continuación, los resultados obtenidos mediante el ajuste de las curvas para las siete estaciones hidrológicas fueron los siguientes:

a. La Reforma	
Grado 1	Grado 2
 $Q(\text{m}^3/\text{s}) = 12.904H - 13.479$ $R^2 = 0.8781$	 $Q(\text{m}^3/\text{s}) = -6.861H^2 + 31.784H - 26.213$ $R^2 = 0.8854$
b. San Rafael	
Grado 1	Grado 2
 $Q(\text{m}^3/\text{s}) = 10.0111H - 13.3279$ $R^2 = 0.9106$	 $Q(\text{m}^3/\text{s}) = -3.762H^2 + 23.098H - 24.475$ $R^2 = 0.9185$
c. Pte Chámeza	
Grado 1	Grado 2

PROPUESTA DEL AJUSTE DE LAS CURVAS DE GASTO DE LA CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA A UNA ECUACIÓN MATEMÁTICA

 <p>$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 22.062H - 17.959$ $R^2 = 0.9567$</p>	 <p>$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 3.4438H^2 + 4.0557H - 2.5485$ $R^2 = 0.9898$</p>
d. La Siberia	
Grado 1	Grado 2
 <p>$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 8.8920H - 4.5983$ $R^2 = 0.9431$</p>	 <p>$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 1.0518H^2 + 5.1561H - 2.0815$ $R^2 = 0.9588$</p>
e. Capitanejo	
Grado 1	Grado 2
 <p>$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 95.09H - 7801.55$ $R^2 = 0.4813$</p>	 <p>$Q(\text{m}^3/\text{s}) = 67.23H^2 + 11044.62H - 453626.94$ $R^2 = 0.6708$</p>

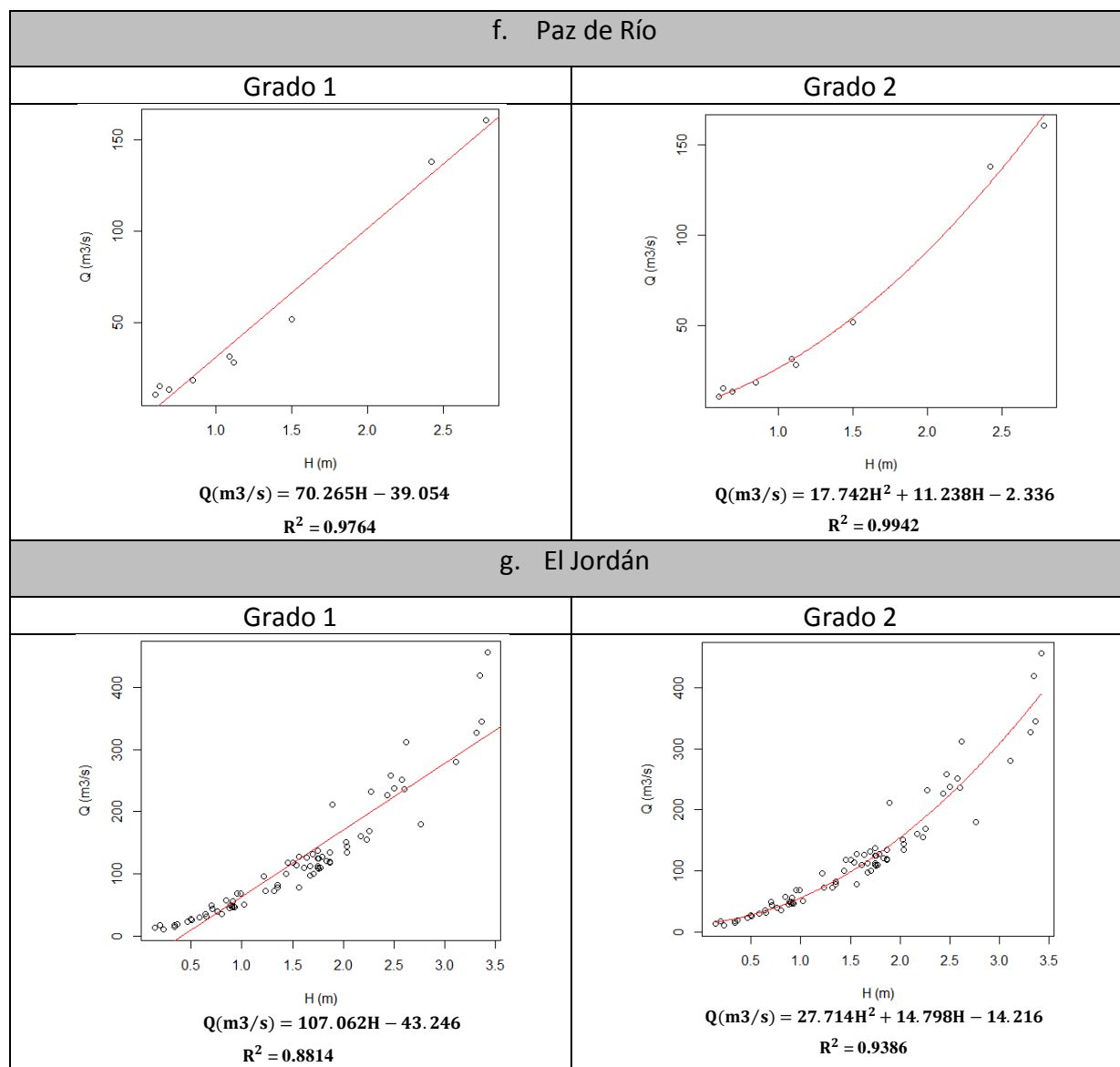


Figura 4. Ajuste de las curvas de gasto de las siete estaciones hidrológicas a ecuaciones matemáticas de grado 1 y 2

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidas las ecuaciones y los coeficientes de correlación se procede a realizar el análisis para cada uno de los resultados expuestos en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la estimación del error mediante el ajuste de las curvas de gasto con ecuaciones matemáticas

ESTACIÓN	CÓDIGO	NÚMERO DE AFOROS	MÉTODO DE EXTRAPOLACIÓN	ERROR DE ESTIMACIÓN (σ curva actual) m^3/s	ERROR EC. GR 1 (σ_1) m^3/s	ERROR EC. GR 2 (σ_2) m^3/s
LA REFORMA	24037130	15	Área-Velocidad	1.18	0.80	0.78
SAN RAFAEL	24037190	16	Área-Velocidad	1.28	0.70	0.66
PTE CHÁMEZA	24037290	27	Stevens	2.52	5.11	2.47
LA SIBERIA	24037320	45	Área-Velocidad	1.20	1.37	1.16
CAPITANEJO	24037390	39	Área-Velocidad	50.12	62.86	61.92
PAZ DE RÍO	24037510	9	Área-Velocidad	6.02	9.30	4.60
EL JORDAN	2403736	78	Área-Velocidad	25.65	32.60	23.45

Fuente: Elaboración propia

De lo anterior, se logra evidenciar que los errores de estimación calculados para las curvas ajustadas mediante ecuaciones fueron menores y no tan alejados de los errores de estimación de las curvas actuales vigentes. A excepción de la estación de Capitanejo, cuyo error fue el más alto contemplado en la ecuación de grado uno con un valor de $62.86 \text{ m}^3/\text{s}$, incluso mayor que el obtenido con el método del IDEAM. Esto último puede deberse a una serie de factores asociados a la irregularidad de la forma del cauce o a la deformación constante de este que afecta la relación estable entre los caudales y los niveles.

A continuación, se presentan los resultados de manera gráfica.

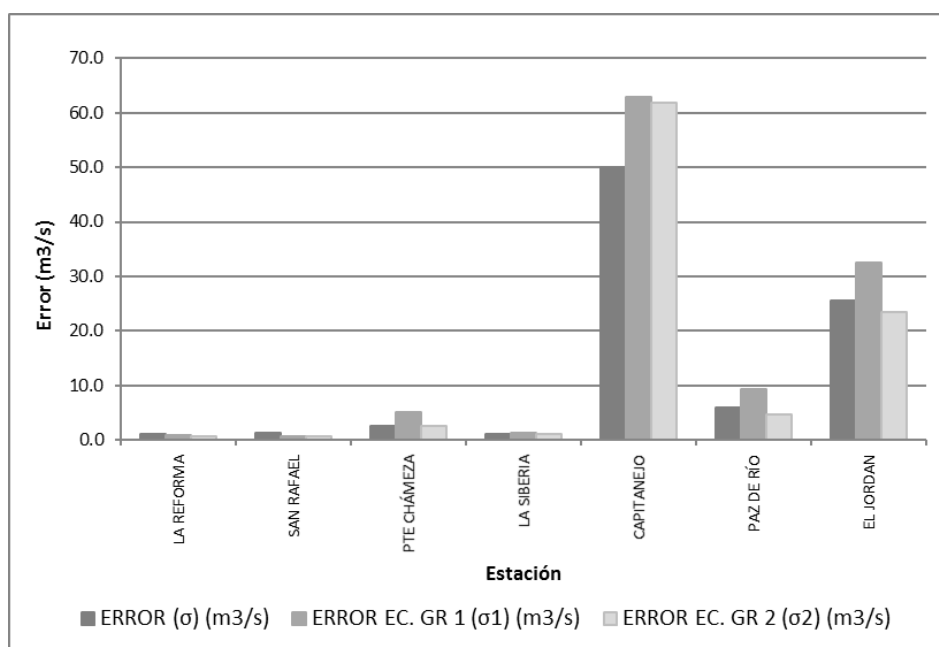


Figura 5. Error de estimación del caudal a través del ajuste de las curva de gasto con ecuaciones matemáticas.

Fuente: Elaboración propia

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se describen los resultados obtenidos a lo largo de la investigación respecto a la posibilidad del ajuste de las curvas de gasto de estaciones existentes en la cuenca del río Chicamocha mediante ecuaciones matemáticas.

En primer lugar, se evaluó la exactitud de las curvas de gasto actuales elaboradas por el IDEAM teniendo en cuenta cierta cantidad de aforos líquidos. La exactitud se evaluó en términos de la dispersión entre los datos empíricos y la curva trazada. Los resultados obtenidos muestran errores de estimación entre 1.18 y $50.12 \text{ m}^3/\text{s}$, en donde los errores aparentemente más altos fueron obtenidos en las estaciones de Capitanejo y El Jordán. Sin embargo, si observamos la tabla 3 se puede evidenciar que los caudales para estas

estaciones son altos, lo que significa que el error obtenido en estas estaciones con respecto al caudal no es tan elevado como parece.

En las curvas de gasto de las estaciones Capitanejo (Fig. 2e) y Jordán (Fig. 2g), se observa una tendencia en la cual la dispersión es más grande en los niveles superiores de la curva en comparación con los niveles inferiores de la curva. Tales dispersiones pueden ser generadas por motivo de deformaciones en el cauce originadas por el depósito de sedimentos o por el contrario, socavación debida a las corrientes del río. Estas deformaciones ocasionan cambios constantes en la toma de datos de nivel, y por consiguiente, errores en la estimación del caudal. Debe considerarse que el error de dispersión presentado por los caudales extraídos de la curva actual vigente no solo se asocian al error de la regresión utilizada para la construcción de la curva sino también a la distribución de los aforos líquidos, por lo que es recomendable que se realice un mayor número de aforos en las épocas de estiaje y en las épocas de aguas altas con el fin de establecer una mejor relación entre los caudales y los niveles.

Como paso siguiente se construyeron las curvas mediante ecuaciones matemáticas y para la selección de la ecuación más favorable se tuvo en cuenta los criterios anteriormente mencionados. De acuerdo con esto, las ecuaciones que cumplen con los criterios de selección para cada una de las estaciones son las siguientes:

Tabla 5. Ecuaciones matemáticas seleccionadas

ESTACIÓN	ECUACIÓN SELECCIONADA	GRADO	R ²	ERROR m ³ /s
LA REFORMA	$Q(m^3/s) = -6.861H^2 + 31.784H - 26.213$	2	0.8854	0.78
SAN RAFAEL	$Q(m^3/s) = -3.762H^2 + 23.098H - 24.475$	2	0.9185	0.66
PTE CHÁMEZA	$Q(m^3/s) = 3.4438H^2 + 4.0557H - 2.5485$	2	0.9898	2.47
LA SIBERIA	$Q(m^3/s) = 1.0518H^2 + 5.1561H - 2.0815$	2	0.9588	1.16
CAPITANEJO	$Q(m^3/s) = 67.23H^2 - 11044.62H + 453626.94$	2	0.6708	61.92
PAZ DE RÍO	$Q(m^3/s) = 17.742H^2 + 11.238H - 2.336$	2	0.9942	4.60
EL JORDAN	$Q(m^3/s) = 27.714H^2 + 14.798H + 14.216$	2	0.9386	23.45

Fuente: Elaboración propia

Para cada una de las estaciones, la ecuación que mejor se ajustó al comportamiento de los aforos líquidos fue la ecuación de grado dos ya que, además de cumplir con un coeficiente de correlación mayor al 0.7, obtuvo un error de dispersión menor que el error de las curvas

actuales vigentes del IDEAM. No obstante, es importante aclarar que para la estación de Capitanejo no se seleccionó ninguna ecuación debido a que no se cumplía con los criterios establecidos y cuya recomendación para que cumpliera se mencionó anteriormente.

Adicional a esto, se evidencia que el error de estimación de las curvas de gasto actuales vigentes, en comparación con el obtenido mediante la ecuación seleccionada, tienden a ser menores a medida que aumenta el número de aforos, por lo que se encuentra que es factible la posibilidad de ajustar las curvas de gasto a ecuaciones matemáticas, siempre y cuando se tenga una cantidad de aforos adecuada para que el error de la curva no se vea afectado significativamente.

8. CONCLUSIONES

A modo de conclusión, es posible optimizar la manera como se construyen las curvas de gasto actuales mediante el uso de ecuaciones matemáticas, dado que los resultados obtenidos muestran una disminución del error de estimación respecto a los errores de las curvas actuales vigentes.

La exactitud de la curva de gasto actual vigente y el valor real de caudal se ven directamente afectados por la cantidad de aforos anuales realizados, ya que, como se mencionó anteriormente, en promedio el IDEAM realiza de tres a cuatro aforos por año, y de acuerdo con la OMM estos deben ser mínimo de diez por año. La exactitud también se ve afectada por la distribución de los aforos líquidos; con campañas de aforos limitadas se debe procurar que estas abarquen el mayor rango posible de niveles, es decir aforar tanto para niveles bajos, como los niveles medios y altos.

Finalmente, la ecuación que cumple todos los criterios establecidos para la selección de la ecuación más favorable y la cual se ajusta al conjunto de datos para cada curva de gasto analizada es la de segundo grado.

9. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS DEL TRABAJO

Se consideran las siguientes:

- Incluir en el análisis otro tipo de errores tales como el de medición en la campaña de aforo y el error de la ecuación que establece la relación caudal versus nivel.
- Hacer estudios similares en cuencas hidrográficas estratégicas en cuanto a la gestión del recurso hídrico
- Realizar campañas de aforo en épocas de aguas altas y de estiaje.

- Realizar un mayor número de campañas de aforo con el fin de generar menores dispersiones de los datos garantizando una mejor construcción en la curva de gasto.
- Se hace prioritario trabajar el tema de optimización del número de mediciones hidrológicas en las estaciones hidrológicas para tener un número adecuado de los aforos sin afectar negativamente la exactitud de las curvas de gasto.

BIBLIOGRAFÍA

- Corpoboyacá, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2006). *Plan de ordenación y manejo ambiental de la cuenca alta del río Chicamocha*. Tunja.
- Héctor Guzmán Álvarez, H. (1992). *Elaboración de las curvas de gastos en estaciones con regimen influido*. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras. (1988). *Aforos líquidos*. Bogotá.
- Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras. (1999). *Cuenca Hidrográfica del Río Chicamocha: Lineamientos para su recuperación y manejo*. Bogotá D.C.
- Juan León, F. S. (2011). Rating curve estimation using Envisat virtual stations on the main Orinoco river. *Revistas Universidad Nacional de Colombia*.
- Martínez, J. F., Domínguez, E., & Rivera, H. (2012). Uncertainty regarding instantaneous discharge obtained from stage-discharge rating curves built with low density discharge measurements. *Ingeniería e Investigación, Vol 32*.
- Nelson Chaparro Villamizar, C. C. (1992). *Extrapolación curvas de gastos*. Bogotá.
- Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de prácticas hidrológicas. OMM-N°168*. Picon. (Bogotá). Curvas de Gastos: Obtención, validación y almacenamiento.
- Plata, J. F. (2012). *Propagación de errores en cálculos hidrológicos con caudales obtenidos mediante curvas nivel caudal construidas con una baja densidad de aforos líquidos*. Bogotá.
- Preciado, A. P. (1969). *Métodos para elaborar curvas de calibración en cauces aluviales*. Bogotá.
- Salazar, A., & Chaparro, N. (1999). *Ajustes de las curvas de gasto*. Bogotá D.C: HIMAT.